干旱区光伏电站运营对局地生态环境的影响

王怡雯[1,2,3]， 马瑶瑶[1,2,3]， 史培军[1,2,3]， 张钢锋[1,2,3]
（1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875；2. 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院，北京 100875；3. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875）

摘 要：光伏发电符合能源产业发展方向，我国光伏电站在西北干旱地区建设最为广泛，但西北干旱地区生态环境较为脆弱，目前，对于干旱区光伏电站运营过程中可能产生的环境影响尚不清楚。以青海省海南州共和塔拉滩光伏发电园为研究区，基于2023年3月—2024年2月光伏电站内光伏区和自然空地区生态环境指标的观测数据，并结合2000—2020年研究区域的遥感监测数据，综合分析了光伏电站的运营对局地大气、土壤、植被等生态环境要素的影响。结果表明：光伏电站的运营对局部大气起到增湿、增大温度极端值、减缓风速的作用，平均增湿3.87%、减少风速0.25 m·s⁻¹，温度极端值变化1.72 ℃；对局部土壤起到增温、减湿、降低土壤CO_2含量的作用，平均升温1.83 ℃、湿度减少4.81%，土壤CO_2降低156.94 ppm。光伏电站运营能够促进电站所在区域植被覆盖度增加和植被生长，对生态系统固碳能力起到正向促进作用，光伏电站及其周围区域NDVI均值增速比海南州地区快0.001 kg C·m^{-2}·a^{-1}。光伏电站的运营可明显改善周边生态环境，起到空气增湿、土壤增温、防风固沙、促进植被生长的作用，促使局地生态环境不断向好。

关键词：干旱区；光伏电站；野外观测；遥感监测；生态环境

随着气候变化、环境污染和资源匮乏等问题的日益加剧，推动经济社会发展全面绿色转型，实现人与自然和谐共生的现代化建设迫在眉睫。2020年9月，我国提出力争于2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和的目标，其中最重要的举措就是加快传统能源向清洁能源的转型[1]。太阳能是一种清洁可再生能源，具有绿色环保、取之不尽、用之不竭，可获得性强的特点[2-3]，太阳能是替代煤炭、天然气和石油等传统能源最为理想的清洁能源之一。光伏发电是一种新型太阳能利用模式[4]，可以实现太阳辐射能到电能的转化。近几十年以来，全球光伏装机量和发电量都呈指数型快速增长态势[5]，太阳能对传统化石能源的替代速度正在不断加快。中国太阳能资源十分丰富，且有大面积的戈壁荒漠，因此光伏产业发展前景极其广阔。截至2023年12月，中国太阳能发电累计装机容量约6.1×10^8 kW，同比增长55.2%，在所有发电品类中同比增速最快（国家能源局 http://www.nea.gov.cn/），中国已成为全球光伏发电总装机量和年度新增装机容量最大的国家[6]。大规模的光伏电站建设会占用大量的土地，并且在光伏电站长期运营过程中，可能会对周边生态环境产生扰动[7-8]，目前，光伏电站运营对周边区域生态环境的影响过程尚不十分清楚，且存在较大争议。

当前，对于光伏电站生态环境影响的研究大多集中于其对地表太阳辐射、空气温湿度、风、植被和土壤等环境要素的影响[9-13]。例如高晓清等[14]研究发现光伏电场对2 m高处大气具有“增温降湿”效应，但10 m高度则相反。Jiang等[15]却发现，光伏阵列产生的“对流加热效应”可以高达10 m以上。有研究表明，光伏阵列可降低近地表风速，并使得光伏阵列内输沙率减少[16]，对于风向及平均风速却无显著影响[17]。王祎婷等[18]基于MODIS中分辨率卫星遥感数据，并结合气象站资料，发现光伏电站的

收稿日期：2024-02-09； **修订日期：**2024-04-15
基金项目：青海省重点研发与转化项目（2022-SF-173）；国家自然科学基金项目（42101027）；第二次青藏高原综合科学考察项目（2019QZ-KK0606）
作者简介：王怡雯（2000-），女，硕士研究生，主要从事新能源建设对生态环境影响研究. E-mail: 202321051181@mail.bnu.edu.cn
通讯作者：张钢锋. E-mail: gangfeng@bnu.edu.cn

建立可以促进植被生长。张呈春等[19]以宁夏中卫沙漠光伏产业园为研究区，利用气象站实测数据，发现光伏阵列的布设可增加空气湿度、土壤含水量，降低太阳辐射和风速，可以改善沙漠地区的生态环境。已有研究大多针对光伏电站运营对单一环境因子的影响进行分析，没有系统分析光伏电站运营对土壤、大气、植被等生态环境的综合影响。此外，目前分析光伏电站生态环境影响时往往直接基于光伏板旁生态环境的变化，缺乏同一时期电站内非光伏板区（自然状态）的生态环境监测资料作为对照，因此，无法分离出光伏电站运营和自然气候变化对当地生态环境变化的影响。光伏电站建设运营时期一般较长（超过20 a），长期可能对周边生态环境造成不可逆的影响，但目前大多数光伏电站内生态环境监测站观测时间均较短（小于5 a），无法准确评估光伏电站建设运营对当地生态环境的长期影响。

我国光伏电站广泛分布于光照资源丰富的西北干旱地区[20]。由于其地理位置与干旱少雨的气候条件，西北干旱区生态环境较为脆弱[21]，大面积的光伏建设运营可能对当地生态环境产生不利影响。如何权衡西北干旱区电站建设与生态环境保护，是目前亟待解决的关键问题。因此，本研究以青海省海南州共和塔拉滩光伏发电园为研究区，通过对比光伏电站内不同生态环境监测站（光伏区与光伏空地）大气和土壤环境监测数据，进一步利用长序列遥感数据分析光伏电站建设前后植被覆盖及生态系统固碳量等生态指标的变化，系统分析光伏电站运营对局地生态环境的综合影响过程，以期为干旱等环境脆弱地区光伏产业高质量发展提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

塔拉滩光伏发电园位于青海省海南州共和县恰卜恰镇塔拉滩（图1a），平均海拔2920 m。属于典型的温带大陆性气候，冬季寒冷，夏季炎热，全年干燥少雨。其规划面积609.6 km^2，总装机容量1.56×10^4 MWp。塔拉滩光伏发电园自2012年开始建设，2013年正式投入使用，是中国首个千万千瓦级太阳能生态发电园，也是目前全球一次性投入最大、单体容量最大、集中发电规模最大的光伏电站群。2022年，其园区光伏发电量达1.44×10^{10} kWh。此外，其所在的共和县属于典型的荒漠生态脆弱区[22]。

1.2 数据来源

1.2.1 *站点监测数据* 本文以塔拉滩光伏发电园区设立的2个生态环境监测站点对电站内生态环境变化进行对比观测，其中站点一安装在电站内自然空地上（自然状态），站点二安装在光伏板旁，作为对照组；选取其中4个大气环境指标：空气湿度（%）、气温（℃）、气压（kPa）、风速（$m\cdot s^{-1}$）；3个土壤环境指标：土壤CO_2（ppm）、土壤湿度（%）、土壤温度（℃）；共监测7个指标进行研究分析，获取数据时段为2023年3月1日—2024年2月29日。

1.2.2 *遥感数据* 本文使用的数据包括：（1）覆盖研究区的Landsat遥感影像数据（地理空间数据云https://www. gscloud.cn/），其中包括2000—2011年分辨率为30 m的Landsat 5 TM卫星数据和2013—2021年分辨率为30 m的Landsat 8 OLI卫星数据，两部分卫星数据重返周期均为18 d；（2）净生态系统生产力（NEP）数据（国家地球系统科学数据中心http://www.geodata.cn/），来源于全球500 m年陆地生态系统净生产力产品（2000—2020年）。

1.3 研究方法

1.3.1 *实测数据的采集* 为分析光伏电站对大气、土壤环境因子的影响，在光伏电站内布设2个监测站（图1b）。生态监测站一位于光伏电站内空地处（图1c，36.140°N、100.576°E，海拔高度约为2866 m），生态监测点二位于光伏电站内（图1d，36.139°N、100.571°E，海拔高度约为2866 m）。2个生态监测站点均使用JD-NQ12气象站，各个具体指标测量参数如表1所示。数据每1 min记录1次。通过对1 min原始数据计算月平均值、日平均值、日最大值和日最小值，以便进行光伏电站内外各个生态监测指标的比较。

1.3.2 *植被生长状况反演及生态系统固碳能力评估* 植被生长状况参数主要包括归一化差异植被指数（NDVI）、植被覆盖度（FVC）。植被覆盖度是指植被（如茎、叶、枝）在地面的垂直投影与研究区面积的比例[23]，能够有效的反映植被变化特征和生态环境变化，是生态环境评价的重要指标。为研究光伏电站的建设对周围植被生长的影响，利用遥感数据计算2000—2020年研究区附近的NDVI，进一步使用



图1 光伏电站内生态环境监测站点设立位置示意图

Fig. 1 Location diagram of ecological environment monitoring station in photovoltaic power station

二分模型反演得到研究区的FVC,具体公式如下:

$$FVC = \frac{I - I_{soil}}{I_{Veg} - I_{soil}}$$

式中:I为像元的NDVI值;I_{soil}为裸土覆盖时像元的NDVI值;I_{Veg}为全植被覆盖时的NDVI值。考虑到不同天然植被类型区域获取地面实测植被覆盖度数据进行数据检验的困难,本文选取NDVI累计频率5%的NDVI值作为I_{soil},累计频率的95%的NDVI值为I_{Veg}[23]。

进一步下载基于通量网观测的净生态系统碳交换量数据生产的2000—2020年全球陆地生态系统500 m年净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity,NEP)产品(国家地球系统科学数据中心,http://www.geodata.cn),NEP是反映陆地生态系统碳汇/碳源的主要指标之一,代表生态系统的净碳通量[19],可用来评估光伏电站周边植被的固碳能力。

表1 监测站点仪器参数

Tab. 1 Monitoring station instrument parameters

指标	测量范围	分辨率	误差范围
空气湿度/%	0~100	0.10	±3
气温/℃	-40~80	0.10	±0.3(25 ℃)
气压/kPa	30~110	0.01	±0.02 (相对)
风速/(m·s^{-1})	0~60	0.01	±(0.1+0.03V)
土壤温度/℃	-40~80	0.10	±0.5
土壤湿度/%	0~100	0.10	±3
土壤CO_2/ppm	0~5000	1.00	±3(25 ℃)

2 结果与分析

2.1 光伏电站运营对大气环境的影响

由表2可以看出,光伏板旁的空气湿度和气压的日最大值与日最小值均高于光伏空地,光伏板旁温度日最大值高于光伏空地,日最小值低于光伏空地。而风速方面,光伏板旁风速的日最大值与日最小值均低于光伏空地。说明光伏板的安装使其周围空气湿度与气压的最大值与最小值均增大,温度的极端值变大,风速的最大值与最小值均减小。从日平均值来看,光伏板旁空气湿度、温度、气压日平均值均高于光伏空地,说明光伏板的铺设会提高周围空气湿度、温度和气压;但光伏板旁日平均风速要低于光伏空地,表明光伏板的铺设会使周围风速降低。

光伏空地与光伏板旁空气湿度逐月平均值变化如图2a所示,可以发现2个监测站点的空气湿度变化趋势基本一致,但数值相差较大(图2b),其中2023年6月差值最大,为9.54%。除8月、9月,光伏板旁月平均相对湿度均高于光伏空地处,且差异显著($P<0.01$),说明光伏板的设立可以使局地空气湿度增加。温度逐月平均值变化过程如图2c所示,可以看出,2个监测站点温度在2023年7月达到最大值,在2024年1月达到最小值,这与温度的季节变化有关。2个生态监测站点温度差值基本都在2 ℃以内(图2d),差值最大的月份为2023年9月,温差达到1.87 ℃。从趋势上看,光伏板旁的站点温度数值曲线起伏略大于光伏空地站点,差异显著($P<0.01$),这表明光伏板的设立对于区域温度的调节作用在于使该地温度变化更加极端。从差值上看,2023年7—10月光伏板旁站点温度数值高于光伏空地站点,其余月份光伏板旁站点温度低于光伏空地站点。光伏板的建设对局地气压几乎没有影响(图2e),差异不显著($P>0.05$)且差值均在0.3 kPa内(图2f),其中2024年1月差值最大,为0.11 kPa;风速逐月平均值变化过程如图2g所示,2个监测点的风速变化趋势一致,但在数值上差异较大(图2h),其中2023年6月差值最大,为0.67 $m\cdot s^{-1}$。总体来看,除2023年11—12月外,光伏空地站点风速比光伏板旁站点风速数值更高,差异显著($P<0.01$),说明光伏板的设立可削弱风速。

2.2 光伏电站运营对土壤环境的影响

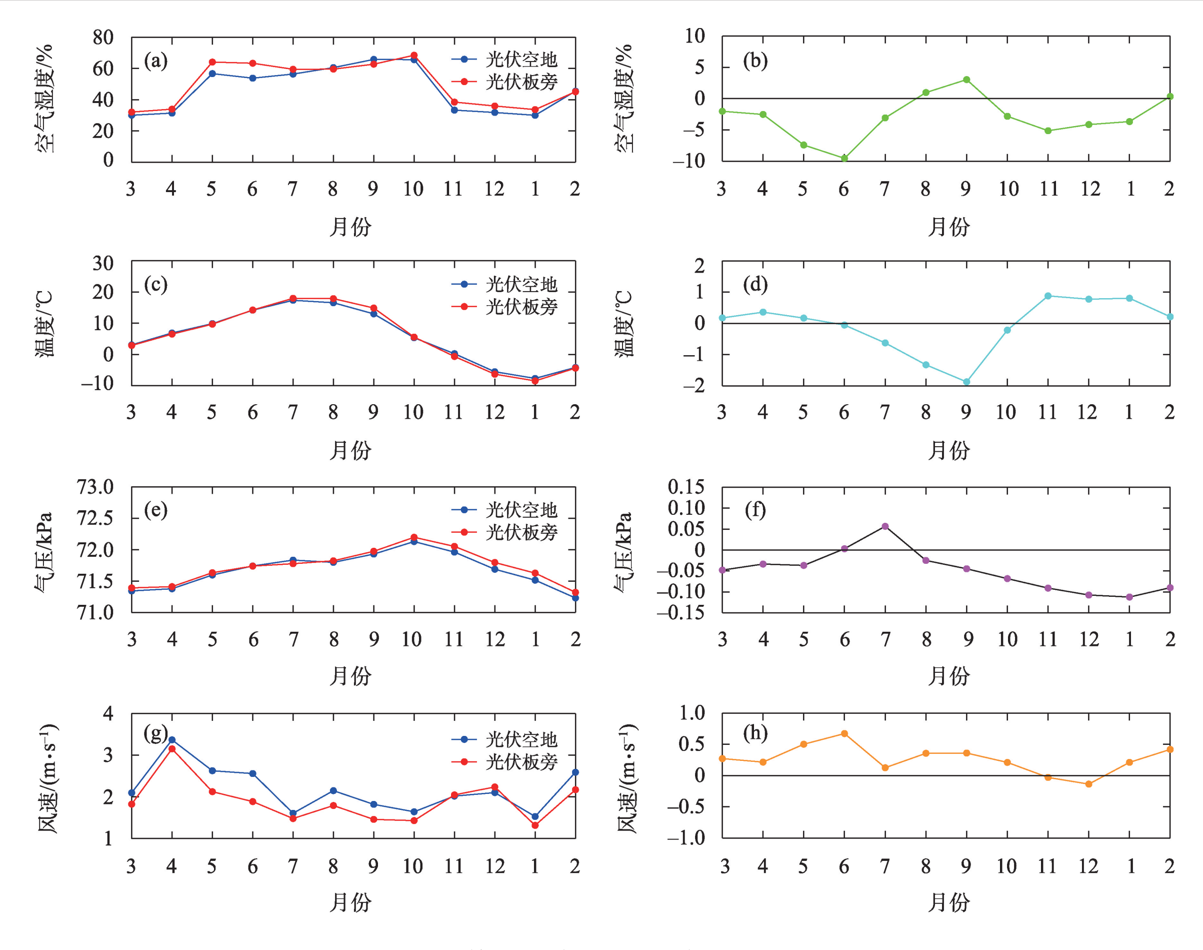
陆地上最大的碳库是土壤,土壤呼吸是土壤中有机碳的主要排放过程,是影响土壤碳库和大气碳库动态变化的重要因素,其轻微的变化将会导致空气中CO_2浓度的明显改变[24]。光伏板旁站点和光伏空地站点土壤环境的差异如表2所示,可以发现光伏板旁的土壤温度日最大值与日最小值均高于光伏空地。土壤CO_2和土壤湿度则相反,日最大值与日最小值均表现为光伏板旁低于光伏空地站点。说明光伏板的安装使其周围的土壤温度增加,而土壤CO_2、土壤湿度的数值减小。从日平均值来看,光伏板旁土壤温度高于光伏空地,说明光伏板的铺设会提高周围土壤温度;而光伏板旁土壤CO_2、土壤湿度均低于光伏空地,表明光伏板铺设处土壤CO_2含量和土壤湿度数值降低。

土壤温度逐月平均值变化过程如图3a所示,可以看出,2个监测站点土壤温度变化过程基本一致。2个生态监测站点土壤温度差值基本都在2.5 ℃以内(图3b),差异最大的月份为2023年7月,

表2 光伏电站内不同区域生态环境监测站点数据对比

Tab. 2 Comparison of ecological environment monitoring station data in different regions of photovoltaic power stations

		空气湿度/%	温度/℃	气压/kPa	风速/($m\cdot s^{-1}$)	土壤温度/℃	土壤湿度/%	土壤CO_2/ppm
日最大值	光伏空地	99.93	25.30	72.98	9.44	25.23	27.92	4845.90
	光伏板旁	100.00	27.42	73.09	8.95	27.84	16.16	3635.17
	差值	−0.07	−2.11	−0.11	0.49	−2.61	11.75	1210.73
日最小值	光伏空地	9.48	−17.82	69.97	0.45	−9.18	5.48	405.40
	光伏板旁	11.44	−19.16	70.04	0.26	−7.42	2.78	401.58
	差值	−1.95	1.34	−0.07	0.19	−1.76	2.71	3.82
日平均值	光伏空地	47.54	3.90	71.73	1.99	6.35	12.81	856.03
	光伏板旁	51.41	5.07	71.81	1.74	8.18	7.99	699.09
	差值	−3.87	−1.17	−0.09	0.25	−1.83	4.81	156.94



注：时间轴为2023年3月—2024年2月。下同。

图2　光伏板旁站点与光伏空地站点空气湿度、温度、气压、风速变化(左列)和差异(右列)

Fig. 2　Air humidity, temperature, air pressure and wind speed changes (left column) and differences (right column) between photovoltaic panel side stations and photovoltaic open ground stations.

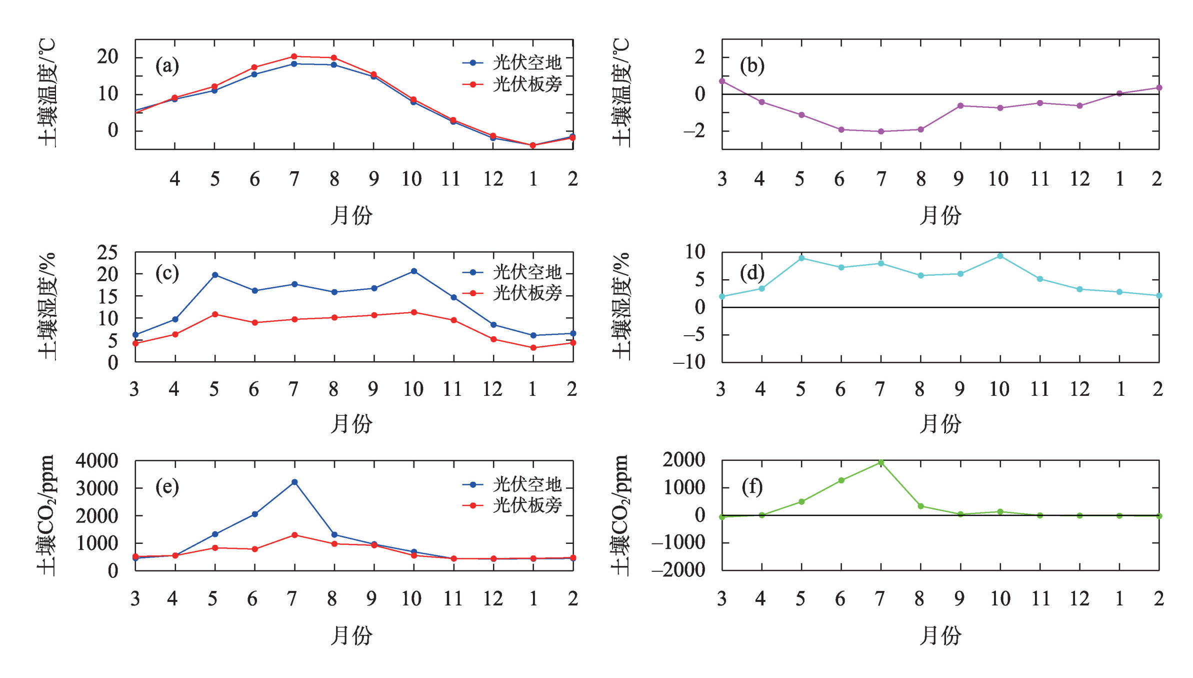


图3　光伏板旁站点与光伏空地站点土壤环境指标变化(左列)和差异(右列)

Fig. 3　Changes of soil environmental indicators (left column) and differences (right column) between photovoltaic panels and photovoltaic open space

温差达到2.03 ℃。总体来看,光伏板旁站点土壤温度数值高于光伏空地站点,差异显著($P<0.01$)。土壤湿度逐月平均值变化过程如图3c所示,可以发现2个监测点的土壤湿度变化趋势一致,但在数值上差异较大(图3d),其中2023年10月差值最大,为9.34%。总体来看,光伏板旁站点土壤湿度比光伏空地站点更低,差异显著($P<0.01$),表明光伏板设立处土壤湿度降低。光伏电站空地与光伏板旁土壤CO_2逐月平均值变化过程如图3e所示,可以发现除2023年5—8月外,2个监测点的土壤CO_2变化趋势基本一致,2023年5—8月光伏板旁土壤CO_2变化趋势比光伏空地土壤CO_2的变化趋势舒缓;在差值方面,2023年7月差值最大(图3f),为1924.80 ppm。除2023年5—8月外,2个监测站点土壤CO_2数值几乎没有差异。总体来看,光伏板旁土壤CO_2月均值低于光伏空地处,差异显著($P<0.01$),表明光伏板的设立使土壤CO_2含量减少。

2.3 光伏电站运营对植被的影响

2.3.1 光伏电站周边区域植被覆盖度变化 图4展示了共和塔拉滩光伏电站及周边区域2000—2020年每5 a的植被覆盖度空间分布,其中2000年,2005年和2010年为光伏建设运营前的自然变化,2015年和2020年为光伏建设运营阶段。为评估光伏电站建设运营对局地植被覆盖度的影响,利用NDVI值反演得到FVC值,并将其划分为6个等级:0%~10%、10%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%来分析近20 a不同等级的植被覆盖度变化情况[25]。通过分析发现,2000年研究区东部FVC等级较高,为40%~60%,但东南角等级较低,为0%~10%。2005年和2010年部分地区植被覆盖度比2000年低,但0%~20%的区域明显减少,大部分地区FVC值在40%~60%,分布较为均匀,表明光伏电站建设前电站所在区域植被覆盖度变化较小;2015年植被覆盖度相比光伏电站建设前变化不大,大部

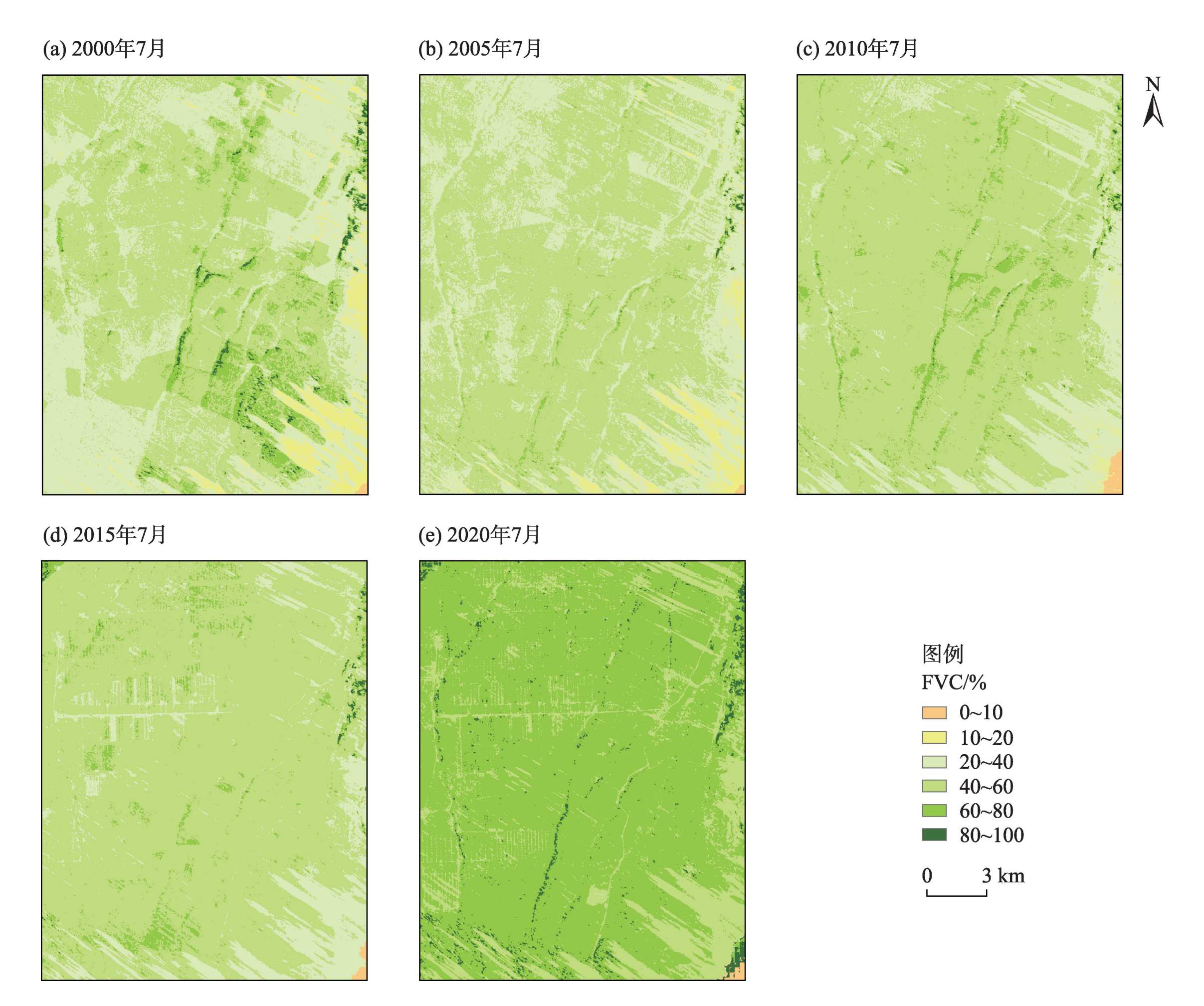


图4 2000—2020年共和塔拉滩光伏发电园所在区域FVC分布

Fig. 4 FVC distribution in the area of Gonghe Talatan photovoltaic power station from 2000 to 2020

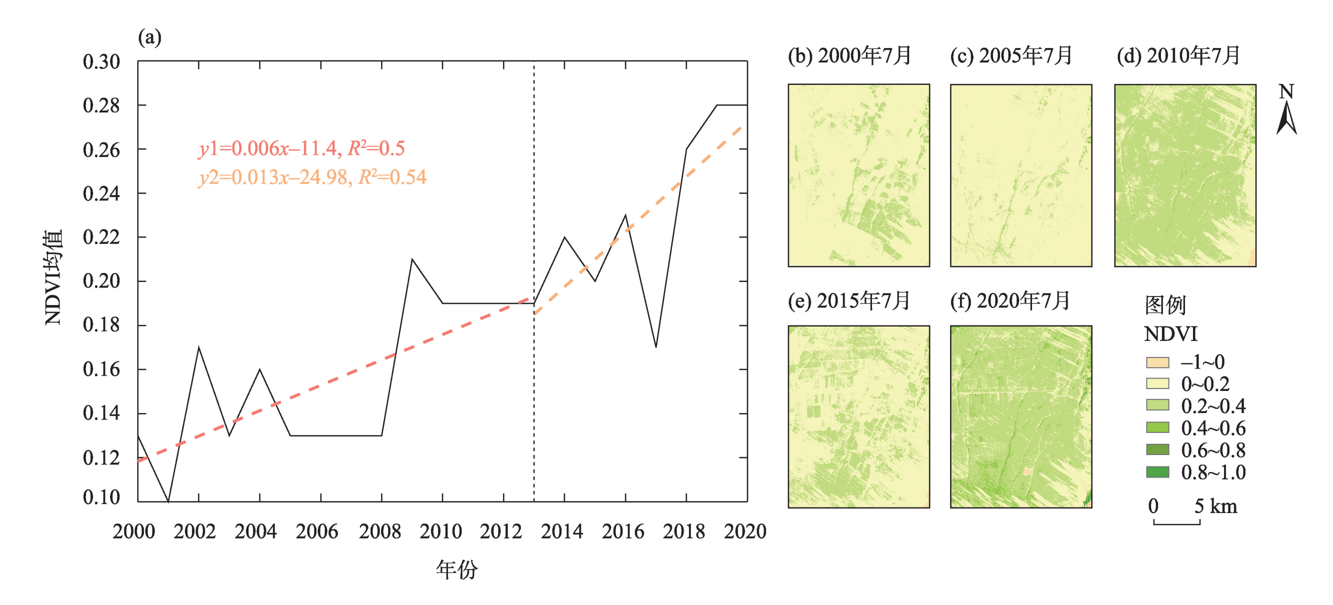
分区域的FVC值中等,为40%~60%;2020年,研究区植被覆盖度等级大幅上升,大部分地区FVC值达到60%~80%,东南部分地区FVC为80%~100%,表明短期内在共和塔拉滩光伏发电园的建设运营对周边植被覆盖度影响较小,但随着运营时间的增长,区域内植被覆盖度可快速提高。

2.3.2 光伏电站建设运营对植被生长状况的影响 由2000—2020年共和塔拉滩光伏电站所在区域NDVI指数(图5a)可知,2000年光伏电站所在区域NDVI均值最小,为0.1,在2020年达到最大值,为0.28。共和塔拉滩光伏园区2012年开始建设,2013年正式投入使用。NDVI均值的变化表明,光伏电站所在区域的NDVI值在建站前的2000—2013年在不断增加(+0.006 a^{-1},$P<0.01$),但光伏电站运营期NDVI增加速率明显加快(+0.013 a^{-1},$P<0.01$),相对建站前提高近1倍,表明光伏电站建设运营可明显促进周边区域植被生长。从2000—2020年共和塔拉滩光伏电站NDVI空间分布可知(图5b~图5f),共和塔拉滩光伏电站2010年以前NDVI值较低,大部分为0~0.2;2010年以后,共和塔拉滩光伏电站NDVI大部分地区为0.2~0.4;2015年相较2010年区域内NDVI值有所下降,部分NDVI值为0.2~0.4的区域退化至0~0.2;而2020年部分区域NDVI可达0.8~1.0。总的来说,共和塔拉滩光伏发电园区域在建站前整体植被生长状况好转,但速率较慢,建站后植被生长的速率明显加快。

2.3.3 光伏电站周边生态系统固碳能力变化 2000—2020年共和塔拉滩光伏电站所在区域NEP平均值变化如图6所示,可以发现以2013年为界,电站所在区域NEP在前后两段时间均呈显著上升趋势,其中2000—2013年的变化率为0.002 kg C·m^{-2}·a^{-1}($P<0.01$),2013—2020年变化率为0.016 kg C·m^{-2}·a^{-1}($P<0.01$),表明光伏电站运营后所在区域生态系统固碳速率大大加快。2000—2020年共和塔拉滩光伏电站的NEP数值均小于0,表明光伏电站所在区域目前主要作为碳源,但随着生态系统固碳能力进一步提高,该区域未来将可能转变为碳汇。

3 讨论

本研究结果显示,光伏板的设立对局地大气环境起到增加温度极端值、增湿、减缓风速的作用。以往研究中,对气温受到光伏电站运营影响的结论往往为单纯的增加或减少,但本研究发现光伏板的设立会使局部地区温度极端值增加,主要是光伏板的设立会增加太阳辐射的反射,或减少地面辐射的损失,因此,在高温时会使局部地区温度增加,在低温时使局部地区温度下降,这表明光伏电板的设立对于温度的影响不是绝对的,而是相对的。光伏板



注:(a)中灰色虚线表示的2013年为光伏电站正式投入使用的年份。下同。

图5 2000—2020年共和塔拉滩光伏发电园及周边区域NDVI均值变化及NDVI分布

Fig. 5 The mean NDVI change of Gonghe Talatan photovoltaic power station and its surrounding areas from 2000 to 2020 and NDVI distribution

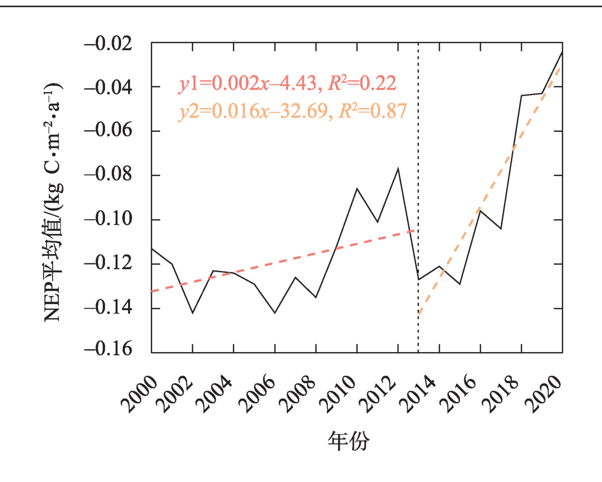


图6 2000—2020年共和塔拉滩光伏发电园所在区域NEP均值变化

Fig. 6 The mean NEP change of Gonghe Talatan photovoltaic power station from 2000 to 2020

旁空气湿度的增加可能与人类活动有着密切关系，为保证发电效率，光伏产业园需要经常冲洗光伏板表面灰尘，因此光伏板旁边的水汽含量与周边地区相比空气湿度更高。光伏板的设立对于局部地区气压的影响较小。光伏板的设立会增加下垫面粗糙度，对风速有着明显的减弱作用。

光伏板的设立对局部土壤环境的影响主要为升温、减湿、降低土壤CO_2含量。土壤温度的变化与气温的变化趋势基本一致，但光伏板的设立对土壤温度起到的增温作用比对气温更加明显，这是因为气温监测仪器安装于距地面2.5 m处，而土壤温度测量仪器埋于地下，因此，地面辐射损失的减小带来的保温作用在土壤的表现更加明显。但高晓清等[26]在格尔木地区的研究中认为光伏电站为冷源，这与本研究得出结果并不相同。通过分析发现，高晓清等[26]的研究中将土壤温度传感器安装于光伏板下方的土壤中，该部分区域土壤温度基本不受太阳照射的影响，而本研究中光伏板旁监测站点的土壤温度传感器安装在光伏矩阵的间隔处，该部分土壤温度同时受到太阳照射和光伏矩阵的影响，因此，本文的结果更直接地反映了光伏电板大规模设立对土壤的保温作用。光伏电板的设立使土壤湿度减少，这与其对空气湿度的增加作用正好相反，这种现象的出现与监测站点设立位置的地势有着密切关联，设立于光伏电站自然空地的监测站处于一个地势较低的位置，有利于水分汇聚积累。由于监测站安装地区存在地势等环境差异，不同区域监测站点土壤湿度的差异并不能完全归因于光伏电站运营的影响，今后还需要更精细的观测，以减少光伏电站对土壤湿度影响的不确定性。土壤CO_2是表示土壤中根系自养呼吸和微生物分解异养呼吸总和的物理量。由于光伏板对于太阳辐射的遮挡，光伏板下植物光合作用减弱，植物根系用来自养呼吸的无机碳减少，土壤中的有机碳也会减少，微生物可分解的物质也减少，因此，光伏板的设立会抑制土壤CO_2的产生与积累，这与Lambert等[27]的结论光伏电板使土壤CO_2值降低相同。

光伏板与裸地类似，NDVI值接近于0。由于研究区光伏板设立较为密集，大部分光伏板栅格和植被栅格在遥感影像中可以被区分出来，虽然小部分栅格存在植被与光伏板共存的情况，但对计算整体植被情况影响较小，因此，基于NDVI指数能够有效反映电站的植被情况及其变化。共和光伏电站于2012年开始建设，2013年正式投入使用，施工对光伏电站区域内的植被造成了一定程度的破坏，但在2013—2020年已经恢复至光伏电站建设前的水平，部分区域植被状况更好于建站之前。进一步将研究区的植被覆盖变化与其所在的海南州作比较，发现光伏电站建设后周边区域NDVI增加速率($y2$)比海南州整体NDVI增加速率($y1$)要高(图7)。这表明海南州当地生态治理政策对植被整体恢复也产生了促进作用，但光伏电站所在区域植被恢复受光伏电站运营影响较大，在光伏电站所在区域的植被恢复中，光伏电站的运营起到更为重要的作用，这与李少华等[28]的结论光伏板的设立可促使荒漠草

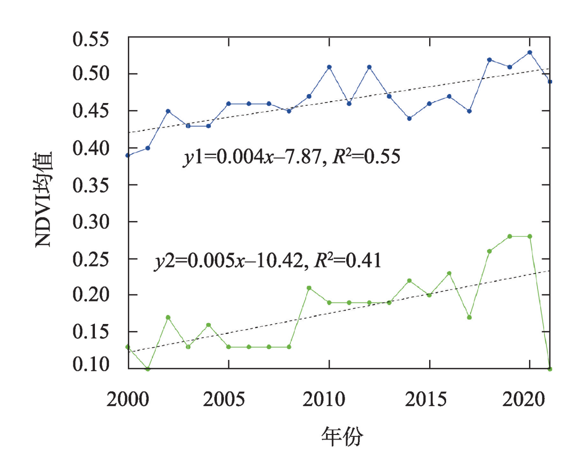


图7 2000—2021年研究区与海南州NDVI均值变化

Fig. 7 The mean NDVI changes in the study area and Hainan Prefecture from 2000 to 2021

原向正向演替发展一致,其他研究中[29-30]也有相似的结论。此外,“光伏羊”为塔拉滩光伏发电站的特色牧光互补项目,该项目的进行对光伏电站区域植被变化的影响有待进一步的研究。

由于监测站需要定时维护,如果将监测站安装在野外自然区会导致维护出现困难,且监测仪器可能会受到周边牧民放牧等活动的破坏,无法保证设备安全。经综合考虑,本研究选择将代表自然状态的监测站安装于电站内的大面积空地处,尽可能远离光伏矩阵,确保周边生态环境其受到光伏电站运营的扰动较小,处于相对自然的状态。另外,本研究选取2个监测站点数据对比,数量较少,后续研究中可以增设站点数量,以增强研究结果的说服力。本文研究了在光伏电站建设下各个环境因子的变化情况,对各个因子间的相互作用分析不够,在接下来的研究中应当更加重视光伏建设影响下各因子间相互作用机制的研究,可以通过建立模型等方法进行。

4 结 论

本文以青海省海南州共和塔拉滩光伏发电园为研究区,基于现场观测得到的光伏电站内光伏板旁和自然空地处各大气和土壤环境指标数据以及Landsat卫星系列遥感影像数据,综合分析了光伏电站的运营对局地大气、土壤、植被等生态环境的影响,得出以下结论:

(1) 光伏板的设立起到增湿、减缓风速、增大温度极值的作用。建站后光伏板旁相对自然空地空气湿度平均增加3.87%,风速平均减小0.25 $m\cdot s^{-1}$,光伏板旁与光伏空地温度差值最高可达1.87 ℃,差异显著($P<0.01$)。

(2) 光伏板的设立可以使局部土壤升温、减湿、土壤CO_2含量降低。光伏板旁相对于自然空地土壤温度平均增高1.83 ℃,土壤湿度平均降低6.52%,土壤CO_2含量平均降低156.94 ppm,均呈现显著差异($P<0.01$)。

(3) 光伏电站建设后所在区域植被生长状况、植被覆盖度及植被固碳能力相对电站建设前整体转好,2013年前后研究区NDVI增长速率从0.006 a^{-1}增加为0.013 a^{-1},NEP增长速率从0.003 kg $C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$增加为0.016 kg $C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$,与海南州地区相比,光伏电站及其周围区域NDVI均值增速更快,增速差值为0.001 kg $C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。

(4) 光伏电站的建设可以明显改善干旱区的环境,对干旱区的生态环境有着促进作用,有利于植被恢复和土壤改良,可促使局地生态环境正向发展。

参考文献(References):

[1] 曹霞. 碳达峰碳中和背景下我国新能源产业发展与升级[J]. 中国市场, 2022(34): 60-62. [Cao Xia. The development and upgrading of China's new energy industry under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Market, 2022(34): 60-62.]

[2] 葛华云. 基于光伏组件的电位诱发功率衰减的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014. [Ge Huayun. Photovoltaic Module Based on PID (Potential Induced Degradation) Research[D]. Changchun: Jilin University, 2014.]

[3] Li G, Li M, Taylor R, et al. Solar energy utilisation: current status and roll-out potential[J]. Appled Thermal Engineering, 2022, 209: 118285.

[4] 蒋俊霞, 高晓清. 光伏系统气候效应及影响机理研究进展[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 953-962. [Jiang Junxia, Gao Xiaoqing. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 953-962.]

[5] 李培都, 高晓清. 光伏电站对生态环境气候的影响综述[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 702-710. [Li Peidu, Gao Xiaoqing. The impact of photovoltaic power plants on ecological environment and climate: A literature review[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 702-710.]

[6] Li J, Chen S, Wu Y, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? A review of wind and photovoltaic power consumption in China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 137(C): 110626.

[7] Gregory F N. Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43 (6): 2173-2178.

[8] Zhang H Y, Yu Z G, Zhu C C, et al. Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology[J]. Environmental Pollution, 2023, 320: 121066.

[9] Barron-Gafford G A, Minor R L, Allen N A, et al. The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35070.

[10] 杨丽薇, 高晓清, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2160-2166. [Yang Liwei, Gao Xiaoqing, Lv Fang, et al. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2160-2166.]

[11] 吴川东, 苏泽兵, 刘鹄, 等. 干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 690-701.

[Wu Chuandong, Su Zebing, Liu Hu, et al. Eco-hydrological effects of photovoltaic power generation facilities on dryland ecosystems: A review[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 690−701.]

[12] 朱少康. 光伏电站运行过程中对局地生态环境的影响研究[D]. 西宁: 青海大学, 2022. [Zhu Shaokang. Research on the Impact on the Local Ecological Environment During the Operation of Photovoltaic Plants[D]. Xining: Qinghai University, 2022.]

[13] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 239−247. [Tian Zhengqing, Zhang Yong, Liu Xiang, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: Retrospect and prospect[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 239−247.]

[14] 高晓清, 杨丽薇, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区空气温湿度影响的观测研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2909−2915. [Gao Xiaoqing, Yang Liwei, Lv Fang, et al. Observational study on the impact of the large solar farm on air temperature and humidity desert areas of Golmud[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2909−2915.]

[15] Jiang J, Gao X, Lv Q, et al. Observed impacts of utility-scale photovoltaic plant on local air temperature and energy partitioning in the barren areas[J]. Renewable Energy, 2021, 174: 157−169.

[16] 陈曦, 高永, 翟波, 等. 沙区光伏电场的风沙流输移特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 684−690. [Chen Xi, Gao Yong, Zhai Bo, et al. Transport of wind-drift sand in photovoltaic electric field in sand area[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 684−690.]

[17] Pratt R N, Kopp G A. Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 226−238.

[18] 王祎婷, 王欣悦, 詹迎港, 等. 利用MODIS卫星数据的光伏电站生态环境效应监测与评估[J]. 测绘通报, 2023, 69(8): 108−112. [Wang Yiting, Wang Xinyue, Zhan Yinggang, et al. Monitoring and evaluation of environment effect of photovoltaic power station construction using MODIS satellite data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023, 69(8): 108−112.]

[19] 张呈春, 张维福, 董智今, 等. 碳中和背景下光伏阵列对沙漠地区微气候的影响[J/OL]. 甘肃农业大学学报, 2023, https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20230920.1715.010. [Zhang Chengchun, Zhang Weifu, Dong Zhijin, et al. Impact of photovoltaic arrays on microclimate in desert areas under the background of carbon neutral[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20230920.1715.010.]

[20] 夏军, 郑冬燕, 刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题研讨[J]. 水文, 2002, 47(5): 12−17. [Xia Jun, Zheng Dongyan, Liu Qing'e. Study on evaluation of eco-water demand in Northwest China[J]. Journal of China Hydrology, 2002, 47(5): 12−17.]

[21] 李同昇, 陈谢扬, 芮旸, 等. 西北地区生态保护与高质量发展协同推进的策略和路径[J]. 经济地理, 2021, 41(10): 154−164. [Li Tongsheng, Chen Xieyang, Rui Yang, et al. Strategy and path of cooperative promotion of ecological protection and high-quality development in northwest China[J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 154−164.]

[22] 严莉, 曹广超, 康利刚, 等. 基于InVEST模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 314−325. [Yan Li, Cao Guangchao, Kang Ligang, et al. Analysis of spatial and temporal changes in habitat quality and driving factors in Gonghe County using the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 314−325.]

[23] 李春娥, 马静, 何芷. 伊犁河谷天然植被覆盖度的变化特征分析[J]. 地理空间信息, 2022, 20(2): 84−88. [Li Chun'e, Ma Jing, He Zhi. Change characteristic analysis of natural vegetation coverage in Yili River Valley[J]. Geospatial Information, 2022, 20(2): 84−88.]

[24] 王铭. 松嫩平原西部盐碱化生态系统土壤呼吸特征及土壤CO_2无机通量研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015. [Wang Ming. Soil Respiration and Soil Inorganic CO_2 Flux in Saline and Alkaline Ecosystem in the Western Songnen Plain, China[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2015.]

[25] 马瑶瑶, 史培军, 徐伟, 等. 干旱区水电站建设运营生态环境影响遥感监测[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1498−1508. [Ma Yaoyao, Shi Peijun, Xu Wei, et al. Remote sensing monitoring of the ecological environment of hydropower station construction and operation in arid areas: A case study of Longyangxia Hydropower Station[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1498−1508.]

[26] 高晓清, 杨丽薇, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1439−1445. [Gao Xiaoqing, Yang Liwei, Lv Fang, et al. Effect of PV farm on soil temperature in golmud desert area[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1439−1445.]

[27] Lambert Q, Bischoff A, Cueff S, et al. Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO_2 effluxes, and vegetation under a mediterranean climate[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(18): 5190−5202.

[28] 李少华, 高琪, 王学全, 等. 光伏电厂干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 325−329. [Li Shaohua, Gao Qi, Wang Xuequan, et al. Characteristics of vegetation and soil property changes by photovoltaic plant interference in alpine desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 325−329.]

[29] Liu Y, Zhang R, Huang Z, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(18): 2177−2186.

[30] 乔圣超, 喻朝庆, 黄道, 等. "碳中和"下光伏对西北荒漠生态因子与植被分布的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1520−1529. [Qiao Shengchao, Yu Chaoqing, Huang Xiao, et al. The impacts of centralized photovoltaic power plants on ecological drivers and vegetation development in China's northwestern desert regions under the carbon neutrality strategy[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1520−1529.]

The impact of photovoltaic power plant operation on local ecological environments in arid areas

WANG Yiwen[1,2,3], MA Yaoyao[1,2,3], SHI Peijun[1,2,3], ZHANG Gangfeng[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The emerging use of photovoltaic power is aligned with the progression of the energy industry. In China, photovoltaic power plants are widely constructed in the arid areas of the northwest. The ecological environment in the arid areas of the northwest is relatively fragile, and the potential environmental impacts of photovoltaic power plants during operation are not yet fully revealed. In this research, a comprehensive analysis of the impact of photovoltaic power plant construction on the local atmosphere, soil, vegetation factors, and other elements of the ecological environment was performed on the research area of Tala photovoltaic power station in Gonghe County, Qinghai Province (the world's largest photovoltaic industrial park). The analysis combined observational data on ecological indicators of the areas adjacent to photovoltaic panels and the open space for photovoltaic power plants from March 2023 to February 2024 with remote sensing data from 2000 to 2020. The results show that the construction of photovoltaic panels has the effects of warming, humidifying, increasing temperature extremes, and wind speed reducing on the local atmosphere. The average humidification was 3.87%, the wind speed was reduced by 0.25 $m \cdot s^{-1}$, and the temperature extreme value changed by 1.72 ℃. The construction of photovoltaic panels also caused the effects of warming, reducing moisture, and reducing soil CO_2 content in the local soil, with an average temperature increase of 1.83 ℃, a decrease in humidity of 4.81%, and a reduction in soil CO_2 by 156.94 ppm. Finally, the construction of photovoltaic power plants promoted an increase in vegetation coverage and growth in the area, and had a positive promoting effect on the carbon fixation capacity of the ecosystem. The average growth rate of NDVI in the study area was faster than that in Hainan Prefecture; the difference was 0.001 kg $C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. The study shows that the operation of photovoltaic power plants can improve the environment in arid areas, by altering air humidification, soil warming, wind prevention, and sand fixation, promoting vegetation growth, and continuing to promote the local ecological environment.

Keywords: arid areas; photovoltaic power plants; field observation; remote sensing monitoring; ecological environment